

ПРИМЕНЕНИЕ ОБМОТОК С МИНИМАЛЬНЫМИ ЛОБОВЫМИ ЧАСТЯМИ В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Грачев П.Ю.¹, Горшков Р.Г.², Макаров Д.В.¹

¹ Самарский государственный технический университет (СамГТУ), Самара, Россия, pgrachov@mail.ru

² Сызранский филиал СамГТУ, Сызрань, Россия, roman0806@mail.ru

Аннотация — Даны результаты решения задач конструирования и расчета электромеханических преобразователей с повышенной эффективностью, проводники обмоток которых имеют уменьшенное сечение при переходе от активных — к лобовым частям, что позволяет минимизировать объем лобовых проводников. Показаны пути улучшения охлаждения обмоток таких преобразователей, например, при их использовании в электротехнологических установках с повышенными температурами, приводящие к дополнительному снижению объема меди электрических машин.

Ключевые слова — электрическая машина, обмотка, лобовые части, охлаждение, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме роста энергетической эффективности электрических машин (двигателей и генераторов как вращательного, так и возвратно-поступательного движения) во всем мире уделяется значительное внимание [1]. Пути решения этой проблемы для большинства электромеханических преобразователей связаны с решением задач по уменьшению потребляемой ими электроэнергии и улучшению их массообъемных показателей.

В электротехнологических установках применяют электрические машины вращательного и возвратно-поступательного движения: МГД машины, асинхронные машины с вращающимся полем, линейные асинхронные машины с жидкометаллическим ротором. Для большинства электромагнитных и электромеханических преобразователей электротехнологических установок проблему повышения энергетической эффективности нельзя решить без обеспечения интенсивного охлаждения магнитопровода и обмотки индуктора.

Рассмотрим технические решения, базирующиеся на применении обмоток с переменным сечением проводников, снижающие объем меди обмотки машин, потери в меди обмоток и улучшающие охлаждение торцевых частей машины.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Сравним эффективность применения обмоток с переменным сечением проводников в различных типах энергосберегающих электрических машин.

Рассмотрим асинхронные машины с вращающимся магнитным полем и обмоткой только на статоре (машины с полым, короткозамкнутым или сплошным ротором, например, в виде подвергающейся нагреву заготовки [2]). Здесь снижаются объем и масса лобовых частей, а также электрические потери, только одного

конструктивного элемента, также как и в односторонних линейных асинхронных машинах

Во вращающихся асинхронных машинах с фазной обмоткой на роторе, а также в двусторонних линейных асинхронных машинах снижаются объем и масса лобовых частей обмоток, а также электрические потери двух конструктивных элементов электромеханического преобразователя. В таких машинах применение обмоток с переменным сечением проводников более эффективно.

Кроме того, относительная величина экономии меди и снижения потерь электроэнергии зависит от отношения длины магнитопровода к его ширине. Это объясняется тем, что экономия достигается за счет изменения конструкции лобовых частей обмотки. Поэтому наибольший эффект достигается для машин с небольшой шириной магнитопровода.

В электротехнологических установках возможно применение двусторонних линейных электрических машин значительной длины, с небольшой шириной магнитопровода индуктора. Такие типы машин с обмотками, имеющими минимальный объем лобовых частей будут максимально энергоэффективны, если решить задачу обеспечения интенсивного охлаждения в условиях работы при повышенных температурах.

МАШИНЫ С ОБМОТКАМИ С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРОВОДНИКОВ И УЛУЧШЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Известна двухслойная стержневая волновая обмотка электрической машины [3], у которой существенно уменьшен объем лобовых частей.

Техническим результатом рассмотренного далее предложения (подана заявка на изобретение) является улучшение охлаждения электрической машины с обмоткой такого типа при одновременном уменьшении расхода материала на ее изготовление.

Этот результат достигается изменением формы проводников обмотки, у которой по крайней мере значительное число мест соединения лобовых проводников с активными проводниками расположены у краёв торцевой поверхности зубцово-пазовой зоны сердечника. Это позволяет расположить лобовые проводники преимущественно над центральной частью зубцово-пазовых зон сердечника, что существенно уменьшает их длину.

Упомянутые места соединений активных проводников с лобовыми проводниками имеют площади соединения меньше усредненных по длине паза площадей поперечных сечений этих проводников.

Отличие предложенного технического решения в том, что активные проводники с уменьшенной площадью мест соединений выполнены так, что площадь поперечного сечения их концов постепенно увеличивается по направлению к центрам пазов, а лобовые проводники выполнены так, что площадь поперечного сечения их концов также постепенно увеличивается по направлению к центрам этих лобовых проводников.

Пример конкретного выполнения показан на рис. 1, 2.

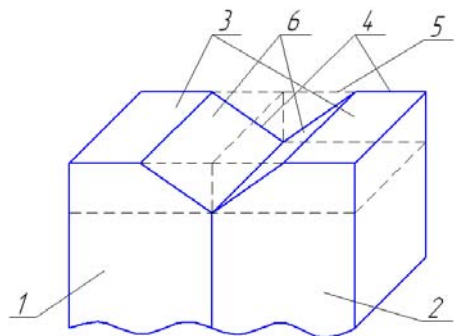


Рис.1. Стержни обмотки.

На рис. 1 показан вид части стержней экономичной обмотки электрической машины, находящихся в одном пазу сердечника этой машины вблизи лобовых частей. Изображены: стержни 1 и 2 с уменьшенной площадью сечения 3 соединения их с лобовыми проводниками.

Выделены пунктиром концы 4 стержней. Видно, что площади поперечных сечений концов стержней линейно увеличиваются по направлению к их центрам. Объем части 5, с пунктирными линиями, определяет объем сэкономленной меди для одного стержня. Увеличение, площадей наклонных поверхностей 6 этих стержней приводит к увеличению площади их охлаждающей поверхности. Увеличивается теплоотдача с этой поверхности стержней, а также с поверхности стали зубцов сердечника машины (рис.2).

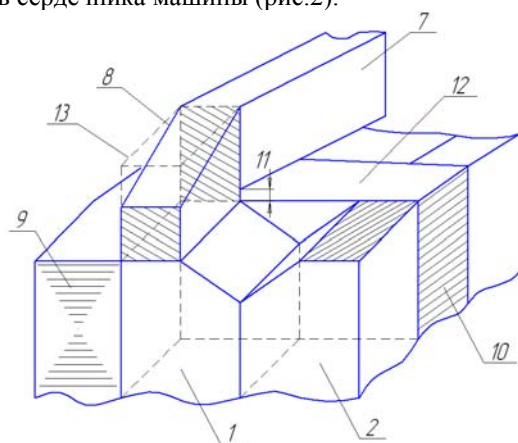


Рис.2. Сегмент активной части статора.

На рис. 2 показан сегмент активной части статора электрической машины с частью одного из лобовых проводников 7, расположенного над торцевой поверхностью зубцово-пазовой зоны сердечника статора.

Конец 8 лобового проводника 7 расположен над местом его соединения 3 со стержнем 1.

Как видно площадь поперечного сечения конца 8 лобового проводника 7 постепенно увеличивается по направлению к центру этого лобового проводника (заштрихованы два сечения конца 8 лобового проводника 7 - с наименьшей и наибольшей площадью). Таким же образом выполнены большинство лобовых проводников предложенной экономичной обмотки электрической машины, а также их соединения со стержнями этой обмотки.

На фиг. 2 изображены также: спинка 9 сердечника и один из зубцов 10 сердечника, воздушный зазор 11 между лобовыми проводниками и поверхностью 12 зубцово-пазовой зоны. Для машин с вращающимся магнитным полем, совокупности лобовых проводников предложенной обмотки имеют вид колец лобовых переключателей [4].

Такое выполнение стержней и лобовых проводников приводит к экономии меди машины. Объем части 13, обозначенный пунктирными линиями, определяет объем сэкономленной меди для одного конца лобового проводника. При большом числе лобовых проводников экономия меди получается существенной.

Это техническое решение может быть применено также при проектировании как двухслойных обмоток ротора асинхронных машин с фазным ротором, так и обмоток якоря коллекторных машин постоянного тока или двухслойных обмоток индукторов линейных машин переменного тока.

Таким образом, предложенная с двумя проводниками в пазу является экономичной, так как позволяет уменьшить расход материала на изготовление активных проводников и лобовых проводников обмотки. Подобным образом могут быть выполнены обмотки с неперекрещивающимися проводниками лобовых частей при большом числе стержней [6].

Отметим, что в таких обмотках увеличивается теплообмен не только между обмоткой и окружающей средой, но улучшается охлаждение также и поверхности зубцов сердечника. То есть наблюдается улучшение охлаждения всех торцевых частей электрических машин с предложенной конструкцией обмоток.

Нужно отметить также, что активное сопротивление предложенной обмотки увеличивается незначительно по сравнению с обмоткой - прототипом, так как изменение плотности тока на участках с уменьшенным сечением увеличивает сопротивления этих участков и в обмотке - прототипе.

Рассмотрим особенности расчета активных и реактивных сопротивлений фаз машины с предложенной экономичной обмоткой.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТОК С ПЕРЕМЕННЫМ СЕЧЕНИЕМ ПРОВОДНИКОВ

Как следует из анализа изменения плотности тока вдоль проводника с переменным сечением, изменение усредненной плотности тока в стержнях и лобовых проводниках предложенной обмотки можно описать трапецией. Такая аппроксимация распределения эквивалентной плотности тока позволяет предложить

следующее выражение для определения активного сопротивления витка рассмотренной экономичной обмотки.

$$R_{\text{вит}} = 2R_{\text{см}} + 2R_{\text{лоб}} + 4R_{\text{см}}^y + 4R_{\text{лоб}}^y + 4R_{\text{уч}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{см}} = \frac{l_{\text{см}} \rho_m}{S_{\text{см}}}$ – активное сопротивление участков стержня с постоянным сечением;

$R_{\text{см}}^y = \frac{l_{\text{см}}^y \rho_m}{S_{\text{см}}^y}$ – активное сопротивление участков стержня с уменьшенным сечением;

$R_{\text{лоб}} = \frac{l_{\text{лоб}} \rho_m}{S_{\text{лоб}}}$ – активное сопротивление участков лобовых перемычек витка с постоянным сечением;

$R_{\text{лоб}}^y = \frac{l_{\text{лоб}}^y \rho_m}{S_{\text{лоб}}^y}$ – активное сопротивление участков лобовых перемычек витка с переменным уменьшенным сечением;

$R_{\text{уч}} = k_g \frac{l_{\text{уч}} \rho_m}{S_{\text{уч}}}$ – активное сопротивление участка с уменьшенным сечением, соединяющего стержни и лобовые перемычки;

ρ_m – удельное сопротивление меди;

k_g – коэффициент, учитывающий изменение плотности тока на участке с уменьшенным сечением;

$l_{\text{см}}^y, l_{\text{лоб}}^y$ – длины участков витка обмотки с уменьшенным переменным сечением проводников;

$S_{\text{см}}^y, S_{\text{лоб}}^y$ – усредненные сечения участков витка, где сечение проводника меняется.

При расчете индуктивности лобового рассеяния необходимо учитывать близость лобовых частей обмотки статора к зубцовой зоне и яру сердечника статора, форму лобовых перемычек и магнитную проницаемость зубцовой зоны.

С этой целью для расчета индуктивностей лобового рассеяния предложено применить два различных метода. Расчет индуктивностей рассеяния перемычек между витковыми группами, – проводить также как в работе [7], а для расчета индуктивностей рассеяния витковых перемычек – методом Роговского, примененным в работе [8] для расчета трансформаторов с дисковой обмоткой..

В нашем случае, витковые перемычки лобовых частей обмотки статора машины, расположенные параллельно друг другу, можно рассматривать как часть витков дисковой обмотки трансформатора, находящиеся над неоднородной поверхностью зубцово-пазовой зоны сердечника.

Для лобовых перемычек предложенной обмотки в виде прямоугольных шин (рис.2), расположенных над чередующимися слоями стали и меди, можно получить приближенное выражение (2):

$$L_{\text{лоб}} = K \frac{2\pi w^2 (l_{\text{лоб}} + 2l_{\text{лоб}}^y)}{h_i} (2\Delta + b_{\text{лоб}}) \times \\ \times \left[1 - \frac{1 - e^{-\frac{2\pi h_{\text{лоб}}}{\tau}}}{\frac{2\pi h_{\text{лоб}}}{\tau}} \left\{ 1 - \frac{\mu - 1}{2(\mu + 1)} e^{-\frac{2\pi \delta_{\text{ср}}}{\tau}} \left(1 - e^{-\frac{2\pi h_{\text{лоб}}}{\tau}} \right) \right\} \right] 10^{-10},$$

где K – коэффициент, учитывающий тип обмотки;

$L_{\text{лоб}}$ – индуктивность рассеяния витковых перемычек фазы обмотки статора (Гн);

w – число витков в фазе обмотки;

$l_{\text{лоб}} + 2l_{\text{лоб}}^y$ – длина лобовых частей одного витка обмотки статора (мм);

$h_{\text{лоб}}$ – высота лобовых перемычек;

$b_{\text{лоб}}$ – ширина лобовых перемычек;

Δ – зазор между лобовыми перемычками;

τ – полюсное деление;

$\delta_{\text{ср}}$ – усредненная величина зазора между внутренней поверхностью лобовых перемычек и торцевой поверхностью зубцовой зоны статора;

μ – усредненная магнитная проницаемость зубцовой зоны сердечника, над которой расположены витковые перемычки.

Анализ выражения (2) показывает, что уменьшение усредненной магнитной проницаемости зубцовой зоны сердечника статора машины, над которой расположены витковые перемычки, относительно магнитной проницаемости стали сердечника, снижает индуктивные сопротивления рассеяния фаз предложенной обмотки. Это положительно влияет на энергетические характеристики электрических машин с обмотками такого типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беспалов, В.Я. Электрические машины. Учебное пособие для ВУЗ-ов. / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – Москва: Academia, 2010. – 320 с.
2. Базаров, А.А. Моделирование и расчет внутренних источников тепла в трехфазном индукторе с вращающимся магнитным полем / А.А. Базаров, А.И. Данилушкин, Е.А. Никитина. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки. – 2009. – № 2(24). – С. 20-127.
3. Патент 2275729 РФ. Обмотка электрической машины / П.Ю. Грачев, Ф.Н. Сарапулов, Е.В. Ежова. Бюл. №12, 2006.
4. Грачев, П.Ю. Эффективность машин переменного тока с неперекрещивающимися проводниками лобовых частей обмоток / П.Ю. Грачев, Е.Е. Горбачев, Д.В. Макаров // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сборник докладов Междунар. науч.-практ. конф. в рамках выставки «Энергосбережение, отопление, вентиляция, водоснабжение» – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С.152–155.
5. Грачев, П.Ю. Влияние конфигурации лобовых частей на расчет параметров специальной асинхронной машины для гибридного автомобиля / П.Ю. Грачев, Е.В. Ежова // Вопросы теории и проектирования электрических машин. Моделирование электромеханических процессов: сборник научных трудов Ульяновский техн. ун-т. - Ульяновск: УлГТУ, 2009. – С. 118-123.
6. Хэг, Б. Электромагнитные расчеты: Перевод с английского. Б. Хэг. Гос. энерг. изд-во, М. – Л., 1934. – 306